

**Н. А. Попов*, В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, Е. Н. Попова,
А. С. Васильев**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

* *n.a.popov@urfu.ru*

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ НАНОФАЗ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ

Рассмотрены особенности структуры и фазовых превращений в монокристаллических никелевых сплавах ЖС36–ВИ ВЖМ5–ВИ после длительных высокотемпературных выдержек.

Ключевые слова: монокристаллический жаропрочный никелевый сплав, структура, фазовый состав.

N. A. Popov, V. P. Kuznetsov, V. P. Lesnikov, E. N. Popova, A. S. Vasilev

THE FORMATION OF NANOPHASES IN BULK SINGLE-CRYSTAL HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS

Changes thin ($\gamma + \gamma'$) structures of single-crystal nickel alloys ZhS36–VI, VZhM5–VI after excerpts in the range of temperatures 1050...1200 °C are investigated.

Keywords: single-crystal nickel-base alloys, structure, phase composition.

Для современных теплонапряженных газотурбинных двигателей (ГТД) рабочие лопатки турбины высокого давления (ТВД) изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) со специальным легированием методом монокристаллического литья с точностью выдерживания основной (профильной) ориентации 5°.

В этой связи перспективным является применение безуглеродистых монокристаллических сплавов, легированных Ta и Re для лопаток ТВД современных ГТД с температурой газа на входе в турбину 1580 °C.

Исследования проводили на монокристаллических образцах из сплавов ЖС36–ВИ и ВЖМ5–ВИ, отлитых в промышленных условиях на установках типа УВНК–8П со скоростью кристаллизации 8–10 мм/мин с кристаллографической ориентацией [001]. Химический состав сплавов и режимы их термической обработки приведены в.

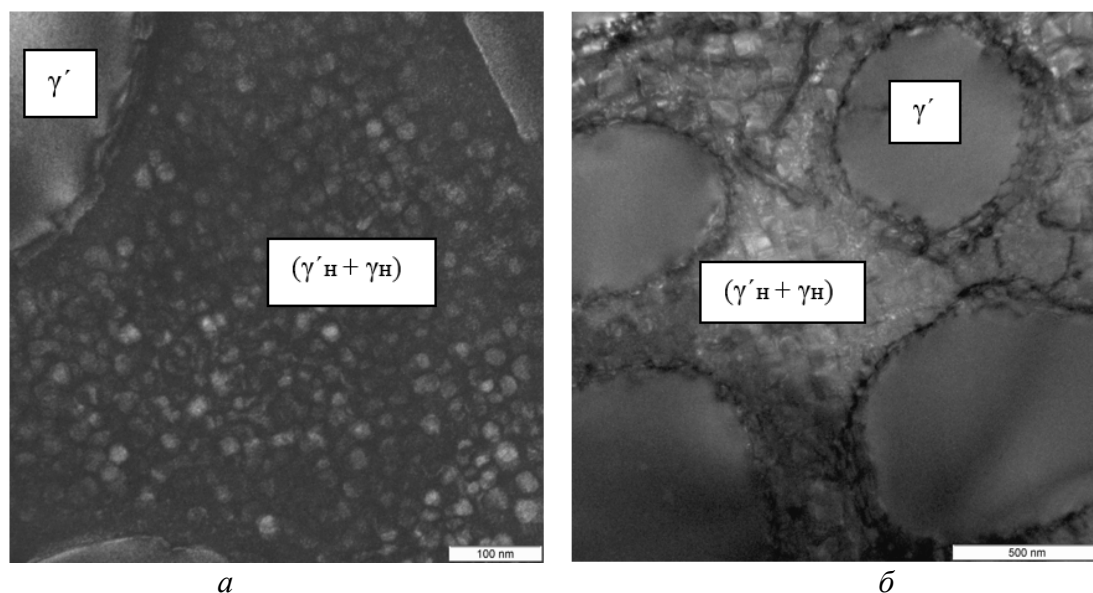
Отлитые заготовки Ø14мм после термической обработки были подвергнуты высокотемпературным выдержкам в течение 0,5...1000 часов в интервале 1050...1200 °C в печной воздушной атмосфере.

Электронно-микроскопические исследования тонкой структуры сплава осуществляли методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) тонких фольг на приборах «Jeol JEM-2100».

После полной термической обработки (ПТО) для сплавов ЖС36–ВИ и ВЖМ5–ВИ типична однородная, дисперсная ($\gamma + \gamma'$)-структура с высокой объемной долей упрочняющей γ' -фазы (70–75 об.%) размером 0,3–0,4 мкм. Частицы γ' -фазы имеют характерную кубоидную форму. Электронографический и микродифракционный анализы показывают, что частицы γ' -фазы выстроены в направлениях типа $[100]_{\gamma}$ монокристалла.

При высокотемпературных выдержках происходит значительный рост размера первичной γ' -фазы, изменение фазового состава, морфологии и размеров γ' - и γ -фаз в сплавах. При охлаждении образцов от температуры выдержки на воздухе происходит распад γ - фазы по схеме $\gamma \rightarrow \gamma_n + \gamma'_n$ и образуется ультрамелкодисперсная смесь ($\gamma_n + \gamma'_n$) наноразмерного уровня. Мелкие частицы γ'_n -фазы имеют размеры 20...60 нм, а прослойки γ_n -фазы между частицами γ'_n имеют толщину порядка 10...20 нм. Формирование γ'_n -фазы так же происходит на границах крупной γ' -фазы со смесью ($\gamma_n + \gamma'_n$).

В темнопольном изображении в сверхструктурном рефлексе $(001)_{\gamma'}$ «светятся» крупные частицы первичной γ' -фазы и вторичные ультрамелкодисперсные частицы γ'_n -фазы (рис.).



Темнопольное изображение в сверхструктурном рефлексе $(001)_{\gamma'}$ тонкой структуры сплава ЖС36–ВИ $[001]$ после высокотемпературных выдержек:

$a - T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}, 500\text{ ч}; b - T = 1150\text{ }^{\circ}\text{C}, 500\text{ ч}$

Установлены закономерности формирования $(\gamma + \gamma')$ -структуры и фазового состава при высокотемпературных выдержках в сплавах, ЖС36–ВИ и ВЖМ5–ВИ. Показано, что при выдержках в интервале температур

1050...1200 °С происходит рост размера первичной γ' -фазы, ее обогащение Al, Ti, Ni, Ta и значительное уменьшение содержания Cr, W и Re в ней. Возрастает толщина прослоек γ -фазы и существенное обогащение ее тугоплавкими элементами W, Re, Cr, Mo. При охлаждении образцов после высокотемпературных выдержек происходит распад γ -фазы и образуется ультрамелкодисперсная смесь ($\gamma_n + \gamma'_n$) наноразмерного уровня: частицы γ'_n -фазы имеют размеры 20...60 нм, а прослойки γ_n -фазы между частицами γ'_n имеют толщину порядка 10...20 нм. На границе первичная γ' -фаза / ($\gamma_n + \gamma'_n$) частицы γ'_n -фазы имеют вытянутую форму вдоль границы раздела и их размер составляет > 100 нм в длину.